

ВОЗМОЖНОСТИ НОВОГО МЕТОДА ПОВЫШЕНИЯ ПЛАСТИЧНОСТИ МАГНИЯ ПРИ ХОЛОДНОЙ ОСАДКЕ

© 2017 г. **Б.И. Каменецкий, Ю.Н. Логинов, Н.А. Кругликов**

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург

Уральский федеральный университет (УрФУ)
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

Статья поступила в редакцию 16.09.15 г., доработана 09.01.16 г., подписана в печать 15.01.16 г.

Предложен новый метод деформации литого магния в холодном состоянии. Он состоит в реализации способа осадки с боковым подпором. Заготовка помещается сначала в обойму из пластичного материала, а затем в контейнер. На заготовку воздействуют пуансоном, установленным в контейнер с зазором. Под усилием пресса металл обоймы вытекает в зазор и создает подпор. В результате возрастает уровень сжимающих напряжений, что повышает пластичность магния. Выполнены опыты по деформации магниевых литых образцов, которые показали, что относительное обжатие без разрушения можно увеличить с 12–18 до 60–70 %. Такое повышение пластичности позволяет получать деформированные заготовки из магния без применения операции нагрева. Предусмотрен прием облегченного извлечения заготовок из обойм после окончания деформации. Выявлено, что процесс возможно осуществлять при средних давлениях осадки 820–830 МПа, что приемлемо для современных инструментальных материалов.

Ключевые слова: литой магний, осадка, сжимающие напряжения, пресс, пластическая деформация.

Каменецкий Б.И. — канд. техн. наук, вед. науч. сотр. лаборатории прочности Института физики металлов (ИФМ) УрО РАН (620990, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18). E-mail: kamenetski@imp.uran.ru.

Логинов Ю.Н. — докт. техн. наук, профессор департамента металлургии УрФУ (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19). E-mail: j.n.loginov@urfu.ru.

Кругликов Н.А. — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физических методов и приборов контроля качества УрФУ, ст. науч. сотр. лаборатории прочности ИФМ УрО РАН. E-mail: nick@imp.uran.ru.

Для цитирования: Каменецкий Б.И., Логинов Ю.Н., Кругликов Н.А. Возможности нового метода повышения пластичности магния при холодной осадке // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2017. No. 1. С. 53–60.
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-53-60.

Kamenetskii B.I., Loginov Yu.N., Kruglikov N.A.

Resources of a new cold upsetting method for magnesium plastification

The study proposes a new method for the cold deformation of cast magnesium. It consists in upsetting using a under lateral pressure. The bar is first placed into a holder made of ductile material, and then into a container. The punch mounted in a container with a gap acts on the blank. Under the press force, the metal contained in the holder flows through the gap and creates a pressure. This increase the level of compressive stresses thus improving magnesium ductility. Deformation tests of cast magnesium specimens were made that showed that the nondestructive reduction of cross-sectional area could be increased from 12–18 to 60–70 %. Such an increase in ductility makes it possible to produce deformed magnesium bars without heating. The method for easier removal of bars from holders after deformation was provided. It was determined that the process could be carried out at moderate upsetting pressures of 820–830 MPa. This is acceptable for modern tool materials.

Keywords: cast magnesium, upsetting, compressive stresses, press, plastic deformation.

Kamenetskii B.I. — Cand. Sci. (Tech.), leading researcher, Laboratory of Strength, Institute of Metal Physics n.a. M.N. Mikheev of Ural Branch of Russian Academy of Sciences (IMP UB RAS) (620990, Russia, Ekaterinburg, S. Kovalevskoi str., 18). E-mail: kamenetski@imp.uran.ru.

Loginov Yu.N. — Dr. Sci. (Tech.), prof., Metallurgical Department, Ural Federal University (UrFU) n.a. the first President of Russia B.N. Yeltsin (620002, Russia, Ekaterinburg, Mira str., 19). E-mail: j.n.loginov@urfu.ru.

Kruglikov N.A. — Cand. Sci. (Phys.-Math.), associate prof. of the Department of physical methods of quality control, UrFU; senior researcher of the Laboratory of Strength, Institute of Metal Physics IMP UB RAS. E-mail: nick@imp.uran.ru.

Citation: Kamenetskii B.I., Loginov Yu.N., Kruglikov N.A. Vozmozhnosti novogo metoda povysheniya plastichnosti magniya pri kholodnoi osadke. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2017. No. 1. P. 53–60.
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-1-53-60.

Актуальность проблемы и цель работы

Магний и его сплавы имеют низкую плотность, высокую удельную прочность, а детали из магниевых сплавов отлично поглощают вибрацию. Коэффициент вибрационной прочности у них в 100 раз выше, чем у аналогичных элементов из алюминия, и в 20 раз больше, чем у стальных изделий. Кроме того, алюминиевые и стальные сплавы уступают магниевым по показателям удельной жесткости. Все это делает выгодным применение магния не только в аэрокосмической отрасли, но и в автомобилестроении при изготовлении деталей, подвергающихся поперечным и продольным изгибающим нагрузкам.

Для получения листов, профилей и других полуфабрикатов из Mg-материалов используют процессы прокатки, экструзии и объемной штамповки, которые осуществляются при температурах 260—450 °С. В этом диапазоне температур магниевые сплавы имеют высокую пластичность благодаря активированию новых систем скольжения в ГПУ-решетке [1—5]. Однако горячая пластическая деформация магниевых сплавов характеризуется следующими недостатками: повышенные затраты энергии на нагрев заготовок, большая длительность технологического цикла, окисление поверхности полуфабрикатов. Последний фактор особенно важен при деформации магния, не имеющего той защитной пленки оксидов, которая образуется на поверхности алюминиевых заготовок.

При комнатной температуре пластические свойства магния и его сплавов имеют низкие значения [6], так как осуществляется только базисное скольжение в ГПУ-решетке, — в целом механизмы деформации этого металла отличаются от обычных из-за особенностей строения кристаллической решетки [7]. Известно [8], что деформация материала вызывает в нем значительно меньшие повреждения, если она выполняется в условиях наложения высоких сжимающих напряжений. Из этого принципа следует, что возможно проведение более интенсивной деформации металлов и сплавов без разрушения. Дополнительные сжимающие напряжения могут быть созданы жидкостью или пластичным твердым телом. Известны два типа устройств, которые применяются для деформации хрупких и малопластичных материалов при комнатной температуре: в первых для создания сжимающих напряжений, действующих на деформируемую заготовку, используется жидкость вы-

сокого давления, а во вторых тем же целям служат металлические оболочки (обоймы). В работах [9, 10] впервые показано, что при создании бокового подпора с помощью пластичной металлической оболочки (обоймы) можно значительно увеличить степень деформации литых образцов магния марки Mg 90 при холодной осадке.

Целью настоящей работы являлась разработка нового метода холодной осадки с повышенным уровнем сжимающих напряжений, что позволит повысить степень холодной деформации металла без разрушения.

Принцип разработанного метода деформации

Предлагается усовершенствованный метод осадки магния и его сплавов, схема которого показана на рис. 1. Основная цель усложнения схемы деформации — повышение уровня сжимающих напряжений, действующих на малопластичный материал, и достижение большей величины деформации без трещинообразования.

Установка была размещена на столе гидравлического пресса марки ДБ-2240 усилием 10 000 кН — верхнюю плиту 1 прикрепляли к ползуну пресса, а нижнюю 5 — к столу пресса (фрагменты ползуна и стола пресса показаны на рис. 1 тонкими линиями). Пуансон 2 был установлен по оси устройства и закреплен на верхней плите 1. Диаметр нижней части пуансона 2 больше максимального диаметра деформированной заготовки (d_1) на 5—10 мм. Контейнер 3 закреплен на нижней плите 5. Выталкиватель 4 и пуансон 2 имеют возможность перемещения в полости контейнера 3 по скользящим посадкам. Подъем и опускание выталкивателя 4 осуществляются от отдельного привода, имеющегося у пресса. Обойму 6 покрывали слоем смазки с обоих торцов и по боковой поверхности и укладывали в полость контейнера 3 на поверхность выталкивателя 4, затем в отверстие обоймы 6 плотно устанавливали магниевый образец, торцы которого также покрыты слоем смазки. В качестве смазки применяли олеиновую кислоту.

При холостом ходе пуансон 2 опускали до касания торцевой поверхности обоймы 6. Взаимное положение деталей устройства в этот момент показано на рис. 1, а. В дальнейшем пресс переключали на рабочий ход, при этом пуансон 2 осуществлял осадку образца и участка поверхности обоймы 6 с исходной высоты h_0 до конечной h_1 . Взаимное

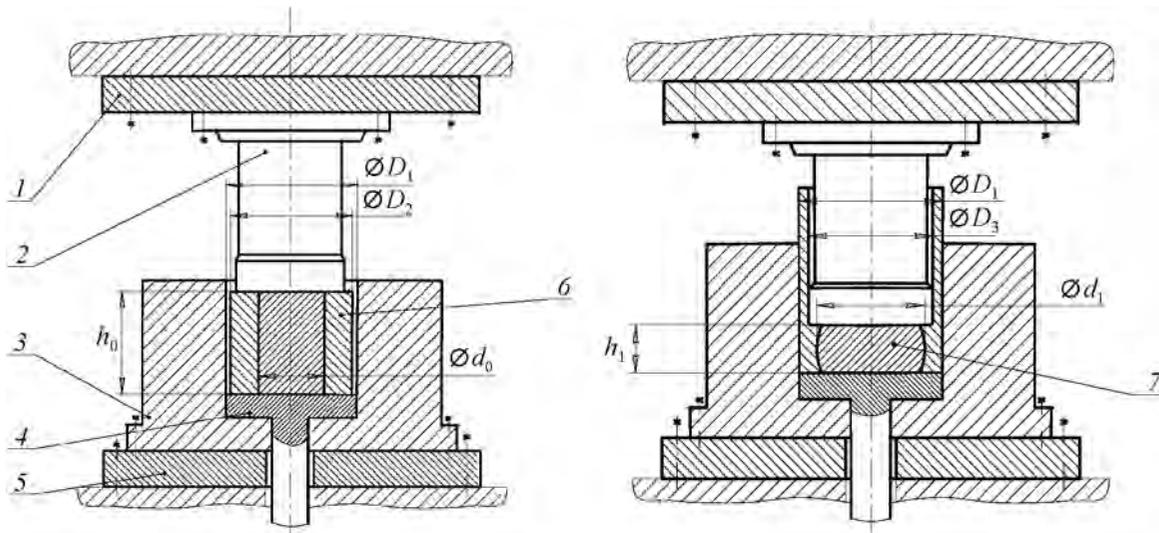


Рис. 1. Схема устройства для холодной деформации магния и его сплавов до осадки (а) и после (б)
 1 – верхняя плита; 2 – пуансон; 3 – контейнер; 4 – выталкиватель; 5 – нижняя плита; 6 – обойма с образцом, размещенным в ее отверстии; 7 – деформированный образец, находящийся в деформированной обойме
 D_1, D_2, D_3, d_0, d_1 – соответственно диаметры полости контейнера, обоймы, пуансона, начальный и конечный диаметры магниевой заготовки; h_0 и h_1 – исходная и конечная высоты Mg-заготовки

положение деталей устройства в момент окончания процесса деформации изображено на рис. 1, б. В результате образец 7 принимал форму бочки с максимальным диаметром d_1 и высотой h_1 , а обойма б – форму стакана с наружным диаметром D_1 , равным диаметру полости контейнера, и дном толщиной h_1 .

Для удаления сборки из рабочего пространства пуансон 2 поднимали в исходную позицию, включали механизм выталкивателя пресса на ход вверх, при этом выталкиватель 4 поднимал деформированную обойму с образцом 7 выше торца контейнера 3. В этом положении сборку снимали с выталкивателя 4 и удаляли из рабочего пространства пресса.

Для разборки деформируемой сборки выполняли надрезы на поверхности обоймы, после чего извлекали деформированный образец.

Схема создания дополнительных сжимающих напряжений

В предлагаемом методе дополнительные сжимающие напряжения на деформируемый материал 1 создаются за счет сил подпора, возникающих при пластическом течении материала обоймы 2 в узкую щель, образованную стенкой контейнера 3 и рабочим пояском пуансона 4 (рис. 2, а). В системе координат $r\varphi z$ торец сборной заготовки перемещается со скоростью инструмента v_{z0} . При этом диа-

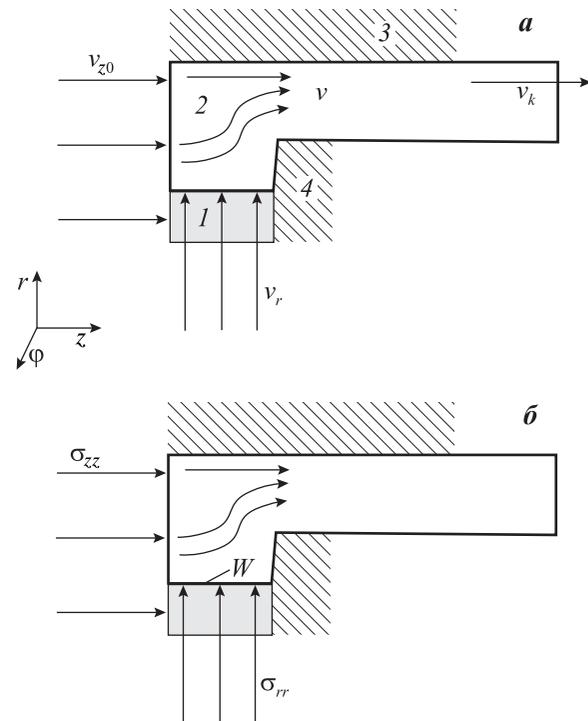


Рис. 2. Схемы кинематически возможных скоростей (а) и статически возможных напряжений (б) в системе координат $r\varphi z$ при выдавливании вспомогательного материала

1 – магниевый образец; 2 – материал обоймы;
 3 – стенка контейнера; 4 – рабочий поясок пуансона;
 W – граница между магниевым образцом и обоймой;
 v – вектор скорости перемещений;
 v_{z0} – скорость инструмента; v_k – скорость истечения;
 v_r – радиальная компонента вектора скорости перемещений

метр магниевого образца увеличивается за счет уменьшения высоты, что следует из условия постоянства объема, поэтому компонента скорости v_r направлена к периферии. Совместное течение металла по осям z и r приводит к появлению векторного поля v и формированию скорости истечения металла на выходе v_k .

При такой кинематике процесса на выдавливаемый металл действуют напряжения σ_{zz} и σ_{rr} (рис. 2, б). Радиальные напряжения σ_{rr} являются дополнительными по отношению к схеме обычной осадки, их величина определяет уровень повышения пластичности металла. Показанная схема деформации материала обоймы в теории пластичности аналогична схеме прессовой прошивки. Согласно [11], напряжения прошивки возрастают при увеличении отношения d/D (d — диаметр прошивающего пуансона, D — диаметр контейнера), по крайней мере в области $d/D > 0,6 \div 0,7$. С позиции механики деформируемого тела это объясняется тем, что для выдавливания пластичной среды в более узкую щель требуется затратить больше энергии. Основным показателем процессов выдавливания является коэффициент вытяжки $\lambda = F_0/F_1$, где F_0 и F_1 — площади поперечного сечения заготовки до и после деформации. По мере осадки граница W между магниевым образцом 1 (рис. 2, б) и заготовкой из материала обоймы 2 перемещается в направлении, указанном стрелками, поэтому площадь поперечного сечения обоймы непрерывно уменьшается, что должно приводить к снижению коэффициента вытяжки λ и, соответственно, напряжений подпора. Одновременно с этим уменьшается отношение высоты очага деформации к его диаметру, что обуславливает повышение сжимающих напряжений.

Алгоритм проведения эксперимента

Образцы для экспериментов по холодной осадке изготавливали из чушки магния трапециевидной формы марки Mg90 (ГОСТ 804-93) по следующей схеме:

— вырезка дисковой фрезой параллелепипедов размерами $22 \times 22 \times (30 \div 35)$ мм;

— изготовление токарной обработкой цилиндров диаметрами $d_0 = 16 \div 20$ мм и высотой $H_0 = 20 \div 30$ мм (высота цилиндра параллельна основанию трапеции).

Контейнер 3 (см. рис. 1), пуансон 2 и выталкиватель 4 изготавливали из стали X12M (твёрдость

$HRC = 50 \div 55$) по ГОСТ 5950-87, верхнюю и нижнюю плиты — из стали 45ХНМФА ($HRC = 35 \div 40$) по ГОСТ 4543-71. Обойму получали из медной проковки, которая была подвергнута холодной осадке с относительным обжатием $\varepsilon_1 = 45\%$ (степень деформации $\varepsilon'_1 = \ln(1 - \varepsilon_1/100)^{-1} = 0,60$) и затем проточена на диаметр $D_2 = 39,8$ мм. Высота обоймы составила $h_0 = 32$ мм, ее внутренний диаметр $d_0 = 16$ мм. Во всех опытах по холодной осадке магниевых образцов (первая серия из 5 шт.) применялся гидравлический пресс марки ДБ-2240 усилием 10 000 кН.

Перед осадкой обойму смазывали с обеих торцов и по боковой поверхности и укладывали в канал контейнера на поверхность выталкивателя. В отверстие обоймы плотно устанавливали магниевый образец, оба торца которого также покрывали смазкой. Осадку образца и кольцевого участка поверхности обоймы осуществляли пуансоном диаметром $D_3 = 34$ мм от исходной высоты 32 мм до конечной высоты 9,5 мм. Относительное обжатие Mg-образца составило 70%, после деформации он имел следующие размеры: диаметры верхнего и нижнего торцов — 28 мм, диаметр средней части заготовки — 31 мм. Обойма после формоизменения обратным выдавливанием со степенью деформации 67% приобрела форму стакана: наружный диаметр $D_1 = 40$ мм (равен диаметру полости контейнера), внутренний диаметр $D_3 = 34$ мм, высота донной части $h_1 = 9,5$ мм, общая высота — 75 мм. При деформации обоймы обратным холодным выдавливанием ее внутренний диаметр изменяется, а наружный диаметр равен диаметру канала контейнера, благодаря этому обеспечивается повышение величины сжимающих напряжений, действующих на торцы и боковую поверхность магниевой заготовки.

Относительное обжатие (%) материала обоймы при обратном холодном выдавливании определяется по формуле [11]

$$\varepsilon_2 = 100(F_0 - F_1)/F_0 = 100(D_3^2 - d_0^2)/(D_1^2 - d_0^2). \quad (1)$$

В соответствии с решением краевой задачи прессовой прошивки [11] относительное удельное давление процесса рассчитывается следующим образом:

$$\frac{P}{\sigma_s} = \beta \left\{ 1,5 + \left(1 - \frac{D_3^2}{D_1^2} \right)^{-1} \ln \frac{D_1}{D_3} + 2 \left[3 \frac{D_3}{D_1} \left(1 - \frac{D_3^2}{D_1^2} \right) \right]^{-1/2} \right\}, \quad (2)$$

где $\beta = 1,1$ — коэффициент; σ_s — сопротивление деформации.

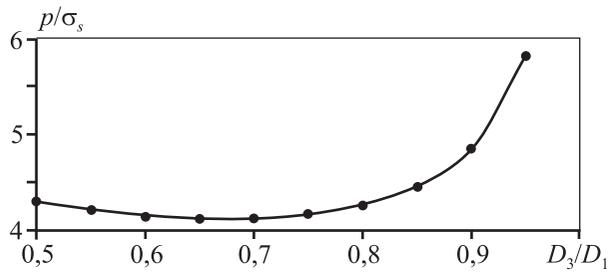


Рис. 3. Зависимость относительного среднего давления, возникающего в схеме прошивки, от соотношения диаметров пуансона и контейнера

Построенная на основе (2) графическая зависимость (рис. 3) показывает, что давления со стороны инструмента превышают сопротивление деформации σ_s в несколько раз, что позволяет создать большой подпор пластическому течению магниевого заготовки и повысить уровень гидростатического (среднего) давления. Особенно сильное регулирующее действие обоймы возникает, если $D_3/D_1 > 0,8 \div 0,9$. В опыте $D_3/D_1 = 34/40 = 0,85$, что дает в соответствии с формулой (2) значение $p/\sigma_s = 4,5$.

По формуле (1) получаем относительное обжатие $\epsilon_2 = 67\%$, или степень деформации $\epsilon'_2 = \ln(1 - \epsilon_2/100)^{-1} = 1,11$. С учетом предварительной степени деформации медной заготовки $\epsilon'_1 = 0,60$ суммарная степень деформации для материала обоймы равна $\epsilon'_\Sigma = 1,71$. Применяя уравнение для кривой упрочнения меди

$$\sigma_{\Sigma} = 80 + 277\epsilon_{\Sigma}^{0,304},$$

получим значение сопротивления деформации меди на участке подпора $\sigma_{\Sigma} = 218$ МПа.

Сопротивление деформации магния в большой степени зависит от направления испытаний [12], при этом сами данные довольно противоречивы. В работе [13] приведена кривая упрочнения магния, согласно которой максимальное значение σ_s при относительном обжатии 8 % равно 150 МПа. Испытания литых образцов магния, описанные в [14], привели к $\sigma_s = 120$ МПа. Однако во всех случаях образцы разрушались при достижении относительного обжатия 8–12 %, поэтому не удавалось получить сведений о сопротивлении деформации при повышенных степенях деформации. Во всяком случае, значения этого показателя у магния и меди соизмеримы, что позволяет в первом приближении в расчетах считать сборку пластически деформируемых сред однородным материалом. Тогда при средней величине сопротивления деформации этой сборки $(120 + 218)/2 = 169$ МПа

получим расчетное значение давления в процессе $169 \times 4,5 = 761$ МПа.

Отметим, что согласно формуле (1) для фиксированных размеров обоймы и магниевого образца при увеличении диаметра нижней части пуансона D_3 возрастает степень деформации обоймы и, в соответствии с (2), существенно увеличивается удельное давление на пуансоне. Следовательно, повышается уровень сжимающих напряжений, действующих на образец в процессе холодной осадки. При осадке образцов диаметром 16 мм и использовании диаметра нижней части пуансона 34 мм максимальное усилие пресса составляло 740 кН, а удельное давление на пуансоне, равное 820 МПа, превышало расчетное значение на 7 %. Данный факт можно объяснить тем, что в ходе осадки с подпором происходит уплотнение материала за счет частичной ликвидации пористости, — это отмечалось применительно к магнию в работе [14] и не учитывается кривыми упрочнения, полученными без влияния подпора.

В отличие от обычной схемы холодной прошивки магния [15] микротрещин и других дефектов на боковой поверхности и торцах образца не обнаружено. Некоторым недостатком данного метода является необходимость выполнения надрезов на поверхности обойм для извлечения образцов. Эта операция существенно увеличивает продолжительность цикла изготовления деформированных образцов, что обуславливает необходимость усовершенствования метода.

Усовершенствование метода

Вторую серию из 5 опытов по холодной осадке литых образцов из магния марки Мг 90 диаметром 16 мм и высотой 32 мм проводили с использованием разъемных обойм, состоящих из двух кольцевых частей. Перед размещением в контейнере боковые и торцевые поверхности кольцевых частей покрывали смазкой, после чего их плотно устанавливали в канал контейнера, образуя обойму с внутренним и наружным диаметрами соответственно 16 и 39,8 мм. Затем в отверстие такой обоймы плотно вставляли магниевый образец и осуществляли осадку при комнатной температуре. Эксперименты проводили при тех же режимах, что и в первой серии опытов. Использование разъемных обойм, в отличие от метода, описанного в работе [9], исключает операции надрезки их поверхности для извлечения деформированных образцов и сокра-

щает время технологического цикла изготовления последних.

Выполненный хронометраж процесса показал, что процесс осадки и удаления деформированного образца и обоймы из контейнера осуществляется за короткое время не более 1 мин, в то время как альтернативный процесс [9] требует затрат около 20 мин, в основном из-за трудоемкости надрезки и удаления обоймы.

Все деформированные образцы не имели микротрещин и других дефектов на боковой поверхности и торцах. Максимальное усилие прессы составило 750 кН, удельное давление на пуансоне — 830 МПа.

Таким образом, при предложенном методе деформации величина осевых и радиальных напряжений составляет соответственно $\sim 7\sigma_B$ и $\sim 6\sigma_B$ (σ_B — предел прочности литого магния), что предотвращает возникновение пор и микротрещин и обеспечивает пластическое течение магния и его сплавов при низких температурах. При фиксированных размерах образца и обоймы величину сжимающих напряжений, действующих на образец в процессе осадки и зависящих от прочности материала обоймы и степени ее деформации, можно регулировать изменением диаметра пуансона.

Изменение структуры металла

В процессе холодной осадки со степенью относительного обжатия 60–70 % происходит преобразование литой структуры магниевого образца в более мелкозернистую бимодальную структуру.

В исходном состоянии литой магний имеет столбчатую структуру с зернами вытянутой формы длиной до 30 мм и шириной до 5 мм (рис. 4, а). Материал в таком состоянии обладает сильной анизотропией свойств [13]. После осадки по описанной методике с относительным обжатием 60–70 % формируется новая бимодальная структура, представленная деформированной матрицей, содержащей большое количество дефектов и зерен со средним размером до 10 мкм, образовавшихся в результате рекристаллизации (рис. 4, б). Дополнительный отжиг при 350 °С в течение 3 ч приводит к получению равноосной структуры со средним размером зерна 0,2 мм (рис. 4, в). С увеличением длительности отжига этот показатель существенных изменений не претерпевает.

Предлагаемый метод холодной деформации магния может быть реализован применительно к

другим малопластичным материалам, поскольку предполагает повышение пластичности металла за счет независимых от свойств материала условий — создания более мягкой схемы напряженного состояния при повышении уровня сжимающих

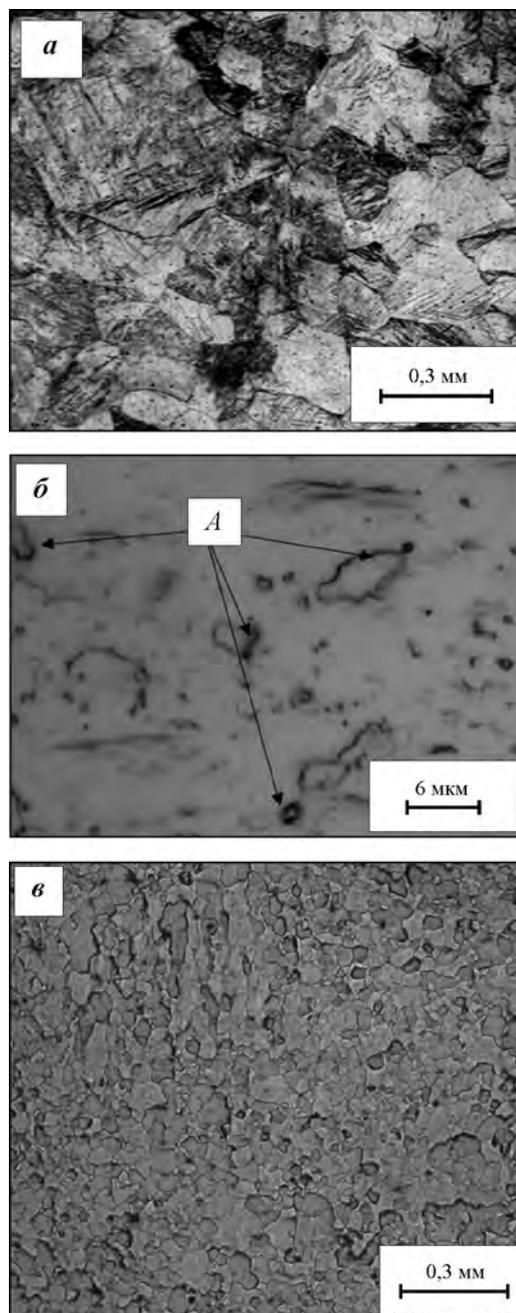


Рис. 4. Структура магния в исходном состоянии перпендикулярно оси вытягивания зерен (макроструктура) (а), после холодной осадки с относительным обжатием 70 % (А — зерна, возникшие в результате рекристаллизации) (б) и последующего отжига (350 °С, 3 ч) (в)

б — оптическая микроскопия с максимальным увеличением
в — оптическая микроскопия с использованием фильтров

напряжений. Однако при использовании данного метода придется учитывать иной уровень пластичности материала, а значит, должен быть подбор других параметров, создающих условия подпора: геометрии обоймы и прочностных свойств материала, из которого она изготовлена. Практическая новизна предложения подтверждена выдачей патента РФ [16] и заключается в возможности деформировать литые магниевые заготовки в холодном состоянии.

В случае деформации магния выявлены предельные значения холодной деформации, которую может выдержать металл без появления трещин. Следующая стадия его обработки предполагает проведение отжига для снятия остаточных напряжений и рекристаллизации для создания равноосной мелкозернистой структуры и повышения механических свойств, что позволит продолжить пластическую деформацию с целью получения конечного продукта.

Выводы

По сравнению с известными способами холодной осадки с боковым подпором предлагаемый метод имеет следующие преимущества:

1. Возможно осуществление холодной осадки литых образцов из магния со степенью деформации 60–70 % за одну операцию формоизменения благодаря повышению величины сжимающих напряжений, действующих на заготовку.

2. Процесс осадки и удаления деформированного образца и обоймы из контейнера осуществляется за короткое время — не более 1 мин, при этом операция извлечения деформированного образца из разъемной обоймы значительно облегчается.

3. Диски, полученные этим методом при изготовлении опытно-промышленных партий дисковых заготовок при комнатной температуре, могут использоваться в качестве заготовок для горячей штамповки и теплой глубокой вытяжки.

4. По сравнению с типовыми технологиями изготовления дисковых заготовок горячей деформацией данный метод позволяет устранить нагрев полуфабрикатов, окисление их поверхности, применение операций по удалению окисленного слоя и существенно сократить затраты на изготовление продукции.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема «Деформация», № 01201463327), а также при финансовой поддержке постановления № 211 Правительства Российской Федерации (контракт № 02.А03.21.0006).

Литература

1. *Powell B.R., Krajewski P.E., Luo A.A.* Magnesium alloys for lightweight powertrains and automotive structures // *Materials, design and manufacturing for lightweight vehicles*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2010. P. 114–173.
2. *Barnett M.R.* Forming of magnesium and its alloys // *Fundamentals of magnesium alloy metallurgy*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2013. P. 197–231.
3. *Nave M.D., Barnett M.R.* Microstructures and textures of pure magnesium deformed in plane-strain compression // *Scr. Mater.* 2004. Vol. 51. Iss. 9. P. 881–885.
4. *Логинов Ю.Н., Буркин С.П., Сапунжи В.В.* Изучение упрочнения и разупрочнения магния с учетом анизотропии свойств // *Изв. вузов. Цвет. металлургия*. 1999. No. 6. С. 42–46.
5. *Логинов Ю.Н., Пышминцев И.Ю., Попов А.А., Лунина Т.Г.* Свойства прессованного гранулированного магниевого сплава со сверхмелкозернистой структурой // *Изв. вузов. Цвет. металлургия*. 1998. No. 6. С. 41–44.
6. *Klimanek P., Potzsch A.* Microstructure evolution under compressive plastic deformation of magnesium at different temperatures and strain rates // *Mater. Sci. Eng. A*. 2002. Vol. 324. P. 145–150. DOI: 10.1016/S0921-5093(01)01297-7.
7. *Qiao X.G., Zhao Y.W., Gan W.M., Chen Y., Zheng M.Y., Wu K., Gao N., Starink M.J.* Hardening mechanism of commercially pure Mg processed by high pressure torsion at room temperature // *Mater. Sci. Eng. A*. 2014. Vol. 619. P. 95–106.
8. *Volkov A.Yu., Kliukin I.V.* Improving the mechanical properties of pure magnesium through cold hydrostatic extrusion and low-temperature annealing // *Mater. Sci. Eng. A*. 2015. Vol. 627. P. 56–60.
9. *Каменецкий Б.И., Логинов Ю.Н., Кругликов Н.А.* Влияние условий бокового подпора на пластичность магния при холодной осадке // *Технол. легких сплавов*. 2012. No. 1. С. 86–92.
10. *Каменецкий Б.И., Логинов Ю.Н., Волков А.Ю.* Методы и устройства для повышения пластичности хрупких материалов при холодной осадке с боковым подпором // *Загот. пр-ва в машиностроении*. 2013. No. 9. С. 15–22.
11. *Сторожев М.В., Попов Е.А.* Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1977.
12. *Narayanasamy R., Sathyanarayanan S., Ponalagusamy R.* A study on barrelling in magnesium alloy solid cylinders during cold upset forming // *J. Mater. Process. Technol.* 2000. Vol. 101. Iss. 1–3. P. 64–69.
13. *Mathis K., Trojanova Z., Lukac P., Caceres C.H., Lend-*

- vai J. Modeling of hardening and softening processes in Mg alloys // *J. Alloys Compd.* 2004. Vol. 378. P. 176–179.
14. Кругликов Н.А., Логинов Ю.Н., Каменецкий Б.И., Саврай Р.А., Долматов А.В., Клюкин И.В., Волков А.Ю. Микроструктура и механические свойства литого магния // *Литейщик России.* 2013. No. 8. С. 17–22.
 15. Matsumoto R., Kubo T., Osakada K. Fracture of magnesium alloy in cold forging // *CIRP Ann. Manuf. Technol.* 2007. Vol. 56. Iss. 1. P. 293–296.
 16. Каменецкий Б.И., Соколов А.Л., Волков А.Ю., Кругликов Н.А. Способ осадки цилиндрических заготовок из хрупких и малопластичных материалов: Пат. 2501624 (РФ). 2013.
- ## References
1. Powell B.R., Krajewski P.E., Luo A.A. Magnesium alloys for lightweight powertrains and automotive structures. In: *Materials, design and manufacturing for lightweight vehicles.* Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2010. P. 114–173.
 2. Barnett M.R. Forming of magnesium and its alloys. In: *Fundamentals of magnesium alloy metallurgy.* Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2013. P. 197–231.
 3. Nave M.D., Barnett M.R. Microstructures and textures of pure magnesium deformed in plane-strain compression. *Scr. Mater.* 2004. Vol. 51. Iss. 9. P. 881–885.
 4. Loginov Yu.N., Burkin S.P., Sapunzhi V.V. Izuchenie uprochneniya i razuprochneniya magniya s uchetom anizotropii svoystv [The study of hardening and softening of magnesium with anisotropic properties]. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya.* 1999. No. 6. P. 42–46.
 5. Loginov Yu.N., Pyshmintsev I.Yu., Popov A.A., Lunina T.G. Svoystva pressovannogo granulirovannogo magnievogo splava so sverkhmelkozernistoi strukturoi [The properties of compacted granular magnesium alloy with ultrafine structure]. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya.* 1998. No. 6. P. 41–44.
 6. Klimanek P., Potzsch A. Microstructure evolution under compressive plastic deformation of magnesium at different temperatures and strain rates. *Materials Sci. Eng. A.* 2002. Vol. 324. P. 145–150.
 7. Qiao X.G., Zhao Y.W., Gan W.M., Chen Y., Zheng M.Y., Wu K., Gao N., Starink M.J. Hardening mechanism of commercially pure Mg processed by high pressure torsion at room temperature. *Mater. Sci. Eng. A.* 2014. Vol. 619. P. 95–106.
 8. Volkov A.Yu., Kliukin I.V. Improving the mechanical properties of pure magnesium through cold hydrostatic extrusion and low-temperature annealing. *Mater. Sci. Eng. A.* 2015. Vol. 627. P. 56–60.
 9. Kamenetskii B.I., Loginov Yu.N., Kruglikov N.A. Vliyanie uslovii bokovogo podpora na plastichnost' magniya pri kholodnoi osadke [Influence of lateral stress conditions on the plasticity of magnesium in the cold upsetting]. *Tekhnologiya legkikh splavov.* 2012. No. 1. P. 86–92.
 10. Kamenetskii B.I., Loginov Yu.N., Volkov A.Yu. Metody i ustroystva dlya povysheniya plastichnosti khrupkikh materialov pri kholodnoi osadke s bokovym podporom [Methods and apparatus for improving the ductility of brittle materials by cold upsetting with lateral stress]. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii.* 2013. No. 9. P. 15–22.
 11. Storozhev M.V., Popov E.A. Teoriya obrabotki metallov davleniem [Theory of metal forming]. Moscow: Mashinostroenie, 1977.
 12. Narayanasamy R., Sathiyarayanan S., Ponalagusamy R. A study on barrelling in magnesium alloy solid cylinders during cold upset forming. *J. Mater. Process. Technol.* 2000. Vol. 101. Iss. 1–3. P. 64–69.
 13. Mathis K., Trojanova Z., Lukac P., Caceres C.H., Lendvai J. Modeling of hardening and softening processes in Mg alloys. *J. Alloys Compd.* 2004. Vol. 378. P. 176–179.
 14. Kruglikov N.A., Loginov Yu.N., Kamenetskii B.I., Savrai R.A., Dolmatov A.V., Klyukin I.V., Volkov A.Yu. Mikrostruktura i mekhanicheskie svoystva litogo magniya [The microstructure and mechanical properties of cast magnesium]. *Liteishchik Rossii.* 2013. No. 8. P. 17–22.
 15. Matsumoto R., Kubo T., Osakada K. Fracture of magnesium alloy in cold forging. *CIRP Ann. Manuf. Technol.* 2007. Vol. 56. Iss. 1. P. 293–296.
 16. Kamenetskii B.I., Sokolov A.L., Volkov A.Ju., Kruglikov N.A. Sposob osadki tsilindricheskikh zagotovok iz khrupkikh i maloplastichnykh materialov [Method of upsetting fragile and low-plasticity cylindrical blanks]: Pat. 2501624 (RF). 2013.